

## Estudo de Caso para Descaracterização de Barragem

Rafael Mendonça Carvalhais

Eng<sup>o</sup> Civil Geotécnico, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte/MG, Brasil,  
rncarvalhais@gmail.com.br

Renata Pereira Gomes

Eng<sup>a</sup> Civil Geotécnica, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte/MG, Brasil,  
renatapgomes97@gmail.com

Sandra Mara Ribeiro

Eng<sup>a</sup> Civil Geotécnica, VALE, Belo Horizonte/MG, Brasil, sandra.ribeiro@vale.com

Frank Marcos da Silva Pereira

Eng<sup>o</sup> Civil Geotécnico, VALE, Belo Horizonte/MG, Brasil, frank.pereira@vale.com

Sofia Martins Torres

Eng<sup>a</sup> Civil Geotécnica, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte/MG, Brasil,  
sofiatorres1888@gmail.com

**RESUMO:** Este artigo tem por objetivo abordar sobre a solução para descaracterização de uma barragem no quadrilátero ferrífero. O arranjo proposto envolve o preenchimento do reservatório com rejeito filtrado até a elevação da crista do barramento. O reservatório deverá ser regularizado com declividade aproximada de 1,0 % na direção dos canais de drenagem projetados nas margens esquerda e direita do reservatório. Foi prevista uma camada final da regularização do reservatório com selo de solo argiloso, semi compactado, sobre a qual deverá ser executada uma proteção vegetal, de forma a reduzir as infiltrações de água que poderiam acarretar elevações de superfícies freáticas no maciço. Os canais de drenagem principais projetados percorrem todo o reservatório. Estes canais recebem as águas superficiais e de canais secundários que coletam todos os pontos de deságue dos talwegues naturais e drenagens superficiais existentes das pilhas próximas. De forma a garantir as condições de suporte para a execução dos canais, foi previsto sob eles, uma camada de rejeito filtrado, com espessura de 1,0m. Em função da grande extensão e áreas dos canais, foi prevista a instalação de uma geomembrana de PEAD, como camada de impermeabilização para reduzir a infiltração de água pela fundação dos canais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens, Descaracterização, Fechamento, Drenagem.

**ABSTRACT:** This article aims to address the solution for de-characterization of a dam in the iron quadrangle. The proposed arrangement involves filling the reservoir with filtered waste up to the dam crest elevation. The reservoir must be regularized with a slope of approximately 1.0% in the direction of the drainage channels designed on the left and right banks of the reservoir. A final layer of regularization of the reservoir was planned with a seal of clayey soil, semi-compacted, on which plant protection must be carried out, in order to reduce water infiltration that could lead to elevations in water tables in the massif. The main drainage channels designed run throughout the reservoir and receive surface water and water from secondary channels that collect all outflow points from natural thalwegs and existing surface drainages from nearby piles. In order to guarantee the support conditions for the execution of the channels, a layer of filtered waste, 1.0 m thick, was provided beneath them. Due to the large length and areas of the channels, it was planned to install a HDPE geomembrane as a waterproofing layer to reduce water infiltration through the foundation of the channels.

**KEYWORDS:** Dams, Decharacterization, Closing, Drainage.

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração no Brasil é uma das principais frentes econômicas no país, responsável por congrega mais de 7.300 empresas e microempreendedores individuais, gerar mais de 204 mil empregos diretos, além de um faturamento de R\$ 250 bilhões, sendo Minas Gerais o estado com a maior participação no faturamento (PMB, 2023). Como consequência da sua grande produção de minério de ferro, também há uma grande concentração de barragens de rejeitos para atender toda a demanda da atividade minerária no estado.

Após os acidentes ocorridos em Fundão em 2015 e da Barragem B1 da mina do Córrego do Feijão em 2019, os estudos foram aprimorados, e os critérios normativos e legais referente a Política Nacional de Segurança de barragens. Nesse contexto, a Resolução nº 95 de 07 de fevereiro de 2022 determina que para todas as barragens de mineração que seja identificada comunidade na ZAS - Zona de Autossalvamento, de acordo com a definição do IBGE, deverão ser descaracterizadas, reforçadas ou deverá reassentar toda a comunidade existente na ZAS.

O estudo de caso apresentado neste artigo tem como proposta para descaracterização da barragem o preenchimento do reservatório até a crista da estrutura, a execução de canais nas margens que receberão as contribuições de água, e a regularização do reservatório com camada de solo argiloso e proteção vegetal por meio de hidrossemeadura. Dessa forma, pode-se promover o fechamento da estrutura e sua reintegração com o meio ambiente.

## 2 METODOLOGIA

Nos itens a seguir são apresentados a geometria proposta para o projeto de descaracterização, os parâmetros geotécnicos de resistência dos materiais considerados para as análises de estabilidade, os critérios e premissas de dimensionamento e as análises de estabilidade realizadas para a estrutura.

### 2.1 Geometria Proposta

A geometria de descaracterização proposta consiste no preenchimento do reservatório até a elevação da crista do barramento (El. 971,70 m), utilizando o rejeito filtrado, com espessura aproximada de 12,0 m.

Os canais de drenagem principais foram projetados nas margens, esquerda e direita, com seção trapezoidal (taludes de 1V:6H) e dimensionados considerando uma declividade de 0,5%, visando um menor desnível do platô devido às suas dimensões. Em função da grande extensão e área dos canais, foi previsto a instalação de uma geomembrana de PEAD - Polietileno de Alta Densidade, como camada de impermeabilização para reduzir a infiltração de água pela fundação dos canais.

Os canais percorrem todo o reservatório, interceptando todo o aporte de água proveniente dos terrenos adjacentes. Além disso, recebem as águas superficiais, de canais secundários que coletam todos os pontos de deságue dos talvegues naturais e drenagens superficiais existentes das pilhas próximas.

O reservatório deverá ser regularizado com declividade aproximada de 1,0 % na direção dos canais de drenagem projetados nas margens esquerda e direita do reservatório. Foi prevista uma camada final da regularização do reservatório com selo de solo argiloso, semi compactado com espessura de 0,40 m, sobre a qual deverá ser executada uma proteção vegetal por meio de hidrossemeadura, de forma a reduzir as infiltrações de água que poderiam acarretar elevações de superfícies freáticas no maciço.

### 2.2 Parâmetros de Resistência dos Materiais

Os parâmetros geotécnicos dos materiais que compõem o corpo da barragem e sua fundação foram obtidos por meio de coletas de amostras indeformadas, execução de ensaios de campo e laboratório. Os parâmetros geotécnicos dos materiais da drenagem interna da barragem foram definidos de acordo com materiais semelhantes utilizados em outras estruturas. A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros geotécnicos adotados nas análises de estabilidade.

Tabela 1. Parâmetros Geotécnicos dos Materiais

Material	Parâmetros adotados								
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	su/ $\sigma'_v$ pico	su/ $\sigma'_v$ liq.	K (m/s)	Kv/Kh
Rejeito Filtrado	20,0	0,0	32,0	-	-	-	-	1,0 E-6	0,1
Estéril	18,0	10,0	27,0	-	-	-	-	1,0 E-6	0,1
Aterro do Maciço Principal e Inicial	18,0	11,0	28,0	10,0	20,0	-	-	7,5 E-8	0,1
Aterro de Reconformação	19,0	17,0	32,0	24,0	14,0	-	-	7,5 E-8	0,1
Areia	18,0	0,0	30,0	-	-	-	-	1,0 E-4	1,0
Brita	18,0	0,0	30,0	-	-	-	-	1,0 E-1	1,0
Rejeito Reservatório	18,0	0,0	30,0	-	-	0,21	0,04	1,0 E-7	1,0
Solo Residual Jovem	19,0	10,0	23,0	20,0	18,0	-	-	1,5 E-6	1,0
Saprolítico de Xisto	19,0	7,0	29,0	-	-	-	-	6,6 E-7	1,0
Xisto Alterado	22,0	40,0	37,0	-	-	-	-	3,0 E-6	1,0
Xisto São	26,0	<i>Infinite Strength</i>		-	-	-	-	1,0 E-7	1,0

Notas:

- Os parâmetros dos materiais que compõem o maciço e fundação da estrutura foram definidos de acordo com os ensaios de compressão triaxial CIUsat – Adensamento isotrópico e cisalhamento por compressão triaxial não drenado, realizados de acordo com a norma internacional ASTM D4767.
- Parâmetros de permeabilidade obtidos por meio de ensaios executados em campo de acordo com ABGE.

### 2.3 Critérios e Premissas de Dimensionamento

Os critérios e premissas adotados no Projeto de descaracterização da barragem avaliada foram: (i) Taludes dos canais de drenagem do reservatório com inclinação 1V:6H, revestidos em gabião colchão; (ii) Preenchimento do reservatório até a crista atual da barragem com rejeito filtrado para promover o fechamento da estrutura; (iii) Ruptura global dos taludes utilizando o método de Morgenstern-Price e Spencer, adotando-se o menor fator de segurança obtido; (iv) Avaliação de superfícies críticas de escorregamento de forma não circular; (v) Análises de estabilidade considerando os cenários de carregamentos estático e dinâmico.

Para o carregamento dinâmico, as acelerações induzidas pelos sismos, considerados nas análises pseudo estáticas, foram definidos com base no método CDA, para uma TR de 2.475 anos; (vi) Tempos de retorno analisados conforme preconizado pela NBR 13.028:2017 e Resolução ANM N°95/2022; (vii) O tempo de concentração total das bacias hidrográficas serão definidos a partir da soma dos tempos de concentração nos talwegues naturais e em canais, calculados por fórmulas empíricas e pelo método cinemático proposto pelo SCS, respectivamente (PINHEIRO, 2011); (viii) Os canais foram dimensionados considerando uma borda livre em relação à profundidade de escoamento calculada, considerando como vazão de dimensionamento a vazão de projeto acrescida de 30% ( $Q_d = 1,30 Q_p$ ), para uma TR correspondente a PMP.

### 2.4 Análises de Estabilidade

As análises de estabilidade ao escorregamento foram realizadas a partir do método de equilíbrio limite, utilizando os métodos de Morgenstern-Price e Spencer, através do software SLIDE, desenvolvido pela Rocscience Inc., em Toronto, Ontario, Canadá. Esses métodos satisfazem as condições de equilíbrio de forças e de momentos e admitem que as forças entre as lamelas têm a mesma direção.

Para as análises efetuadas, foram avaliadas as seguintes condições de carregamento: (i) drenada, com parâmetros efetivos para todos os materiais; (ii) Condição não drenada de pico - Parâmetros totais para os materiais abaixo da superfície freática e razão de resistência de pico –  $S_u/\sigma'v$  (pico) para o rejeito depositado no reservatório; (iii) Condição pseudoestática – Parâmetros totais para os materiais abaixo da superfície freática e razão de resistência de pico –  $S_u/\sigma'v$  (pico) para o rejeito depositado no reservatório, com aplicação do carregamento sísmico; (iv) Condição não drenada liquefeita - Parâmetros totais para os materiais abaixo da superfície freática e razão de resistência liquefeita –  $S_u/\sigma'v$  (liq) para o rejeito depositado no reservatório.

Para as análises de estabilidade na condição pseudoestática, o efeito sísmico é considerado por meio da aplicação de uma força estática adicional no centro de gravidade da massa deslizante. A força adicional é calculada com base na aceleração induzida pelo sismo. Este carregamento será de 0,10g na horizontal, corresponde a uma intensidade VII na escala Mercalli Modificada ou magnitude equivalente a 6.0 na escala Richter. Este valor foi definido utilizado  $\frac{1}{2}$  PGA, variando entre 0,15 e 0,2g, de acordo com recomendação de Griffin e Franklin, Julho, 1984. Na direção vertical foi adotado um carregamento de 0,07g.

A Figura 1 apresenta a seção geológico-geotécnica adotada nas análises de estabilidade, definidas a partir da interpretação das investigações de campo e laboratório.

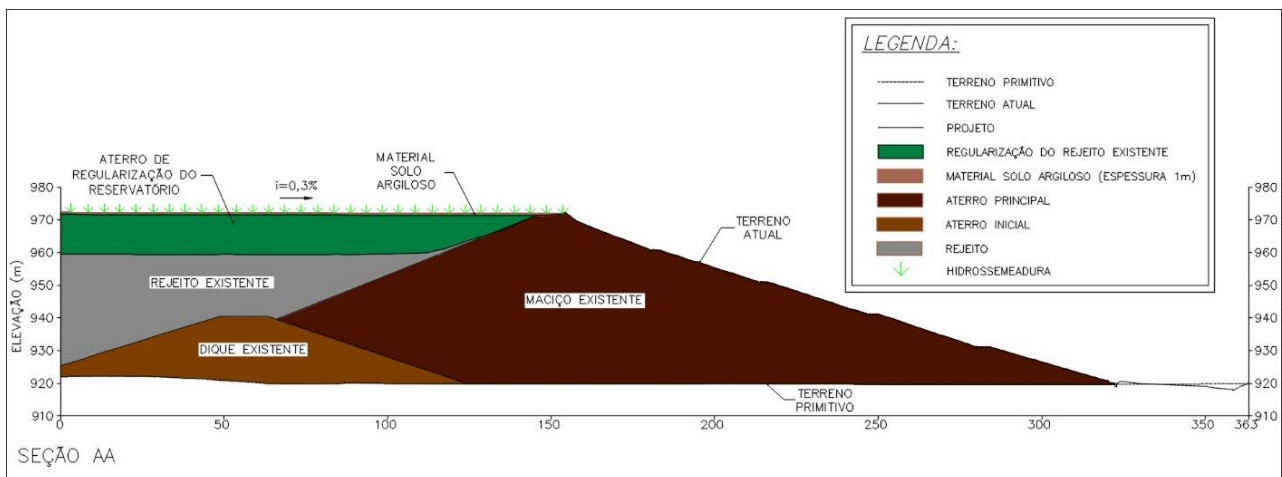


Figura 1. Seção geológico-geotécnica adotada nas análises de estabilidade

Os Coeficientes de segurança mínimos foram definidos com base na norma NBR 13028 - Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos e na Resolução 95 da ANM, de 07 de fevereiro de 2022, que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

Dessa forma, os coeficientes de segurança mínimos são assim definidos: (i) 1,50 para a condição drenada; (ii) 1,50 não drenada de pico; (iii) 1,20 para a condição não drenada liquefeita e (iv) 1,10 para a condição não drenada de pico + sismo (pseudoestática).

### 3 RESULTADOS

Para verificar a eficiência do projeto de descaracterização, apresenta-se a seguir o resultado do arranjo geométrico proposto, após a definição dos canais e a verificação da estabilidade da estrutura.

#### 3.1 Análises de Estabilidade

A Tabela 2 apresenta uma compilação dos coeficientes de segurança obtidos para a descaracterização da Barragem com o preenchimento com Rejeito Filtrado.

Tabela 2. Fatores de Segurança Obtidos

Condição	Fator de segurança	
	Mínimo Recomendado	Obtido
Drenada	1,50	2,00
Não Drenada de Pico	1,50	1,93
Não Drenada Liquefeita	1,20	1,93
Não Drenada de Pico com Sismo	1,10	1,42

### 3.2 Dimensões dos Canais

A Tabela 3 a seguir são apresentados resultados dos dimensionamentos hidráulicos dos canais que compõe o sistema de drenagem superficial para a Descaracterização da estrutura.

Tabela 3. Dimensionamentos Hidrológicos-Hidráulicos dos canais

DIMENSIONAMENTOS HIDRÁULICOS - CANAIS														
Bacia	Revestimento	Seção	TR (anos)	n	i (m/m)	Q de Projeto (m³/s)	Q*1,30 (m³/s)	Profundidade Escoamento (m)	Área Molhada (m²)	Velocidade (m/s)	Número de Froude	Borda Livre (m)	Seção Adotada	
													Base (m)	Altura (m)
<b>OMBREIRA ESQUERDA</b>														
1.1	GABIÃO COLCHÃO	TRAPEZOIDAL	PMP	0,030	0,0050	3,118	4,053	0,60	2,76	1,13	0,47	0,10	1,00	0,70
1.2	GABIÃO COLCHÃO	TRAPEZOIDAL	PMP	0,030	0,0050	22,579	29,353	1,27	12,17	1,86	0,53	0,23	2,00	1,50
1.3	GABIÃO COLCHÃO	TRAPEZOIDAL	PMP	0,030	0,0050	84,861	110,319	1,76	33,40	2,54	0,61	0,24	8,50	2,00
<b>OMBREIRA DIREITA</b>														
2.1	GABIÃO COLCHÃO	TRAPEZOIDAL	PMP	0,030	0,0050	10,775	14,007	0,93	7,00	1,54	0,51	0,57	2,00	1,50
2.2	GABIÃO COLCHÃO	TRAPEZOIDAL	PMP	0,030	0,0050	2,906	3,778	0,58	2,62	1,11	0,46	0,12	1,00	0,70
2.3	GABIÃO COLCHÃO	TRAPEZOIDAL	PMP	0,030	0,0050	24,561	31,930	1,31	12,96	1,90	0,53	0,19	2,00	1,50
2.4	GABIÃO COLCHÃO	TRAPEZOIDAL	PMP	0,030	0,0050	31,231	40,601	1,31	15,62	2,00	0,56	0,19	4,00	1,50
2.5	GABIÃO COLCHÃO	TRAPEZOIDAL	PMP	0,030	0,0050	68,851	89,506	1,76	28,27	2,44	0,59	0,24	5,50	2,00

A Figura 2 apresentada abaixo identifica uma seção típica dos canais projetados, resultado dos dimensionamentos hidrológicos-hidráulicos realizados.



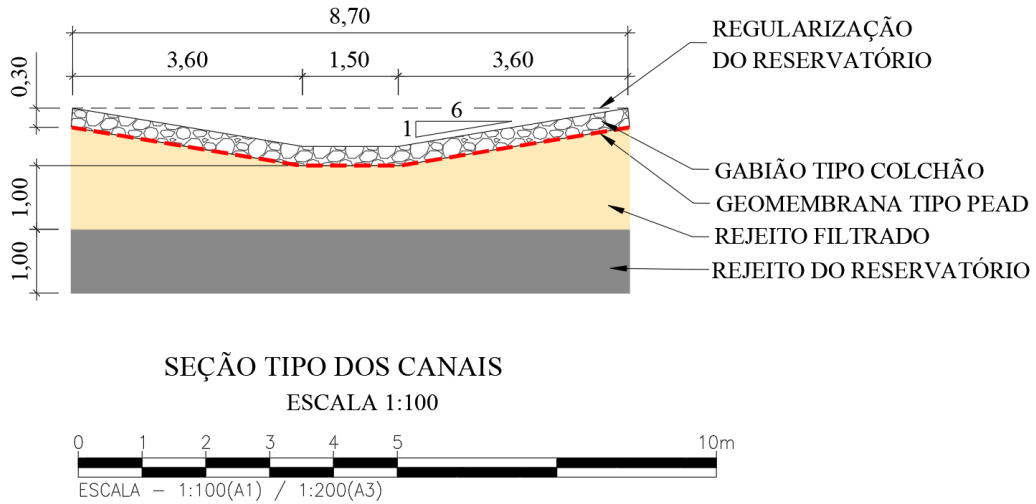


Figura 2. Seção típica dos canais de drenagem

### 3.3 Arranjo Geométrico

Após os estudos e dimensionamentos efetuados, apresenta-se na Figura 3 a seguir o arranjo geral da solução proposta para a descaracterização da Barragem.

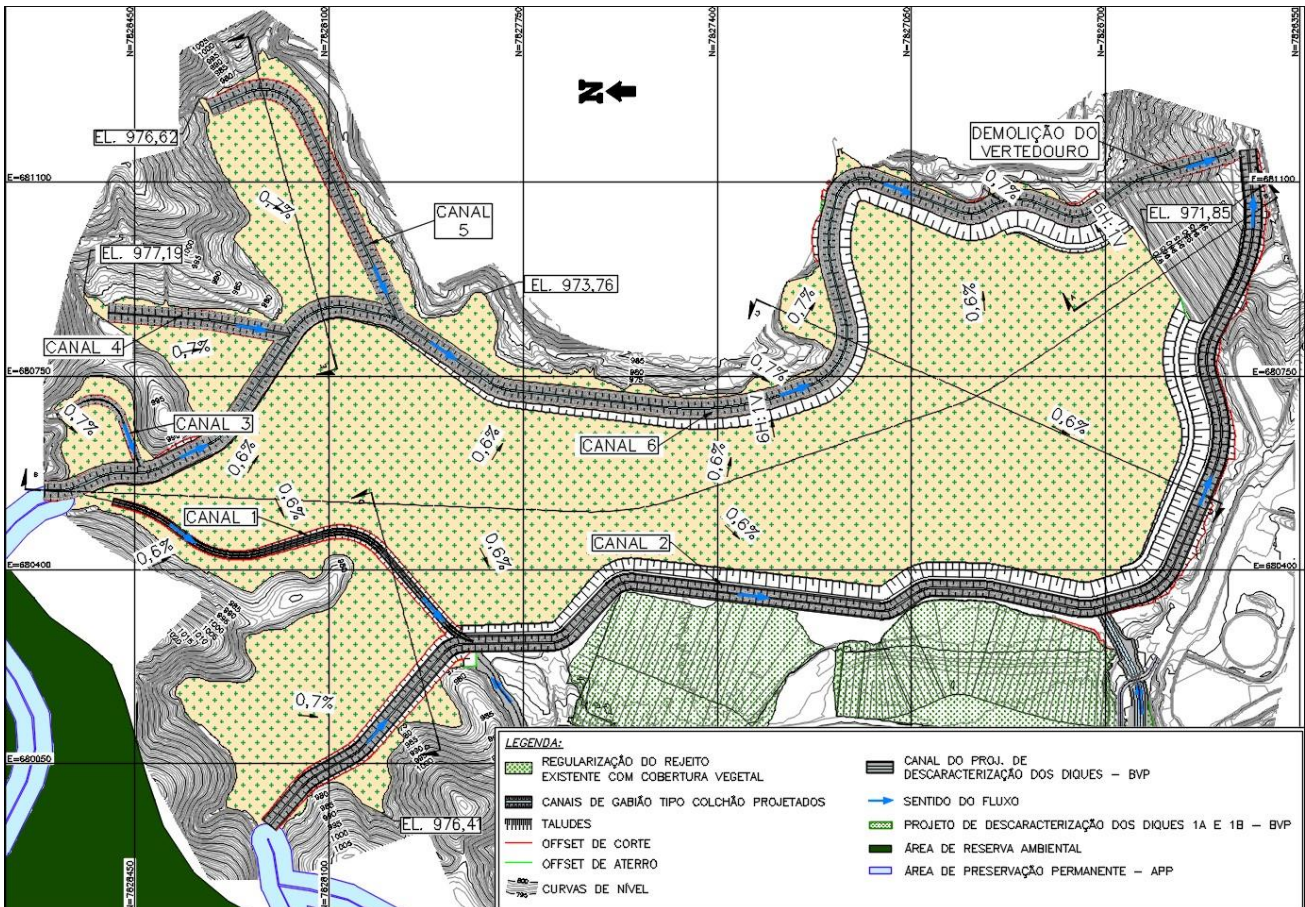


Figura 3. Arranjo Geral – Planta

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os critérios e as premissas que nortearam a elaboração do projeto tinham como objetivo atender as normas e legislações vigentes, bem como permitir a viabilidade de execução.

Para as condições gerais estudadas, o projeto desenvolvido foi satisfatório, uma vez que as análises de estabilidade mostraram que na estrutura descaracterizada os coeficientes de segurança obtidos são superiores aos mínimos exigidos em legislações. Além disso, os canais de drenagem dimensionados estão em concordância às normas vigentes.

Ademais, a utilização do rejeito filtrado como preenchimento do reservatório é um fator importante, permitindo uma disposição segura e aplicando o subproduto da mineração em novos processos. A evolução das boas práticas de mineração e a conscientização sobre a importância de devolver às comunidades do entorno a área recuperada após a exaustão do bem mineral são prioridades (PMB, 2023) .

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 13028. *Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (2021). ABGE. *Investigações geológico-geotécnicas- Guia de boas práticas*. São Paulo.

Agência Nacional de Mineração (2022). Resolução nº 95. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2024.

ASTM International (2020). ASTM D4767: Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils.

Hynes-Griffin M. E., Franklin A. G. (1984), “Rationalizing the seismic coefficient method”, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, (1984), PO Box 631, Vicksburg, Mississippi 391.

Instituto Brasileiro De Mineração (2023). Panorama Mineração do Brasil 2023 (PMB). Brasília, DF, 30 ago. 2023. Disponível em: <https://panoramamineracao.com.br/pmb2023/>. Acesso em: 24 fev. 2024.

Pinheiro, M. C. (2011) *Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração*. Porto Alegre.